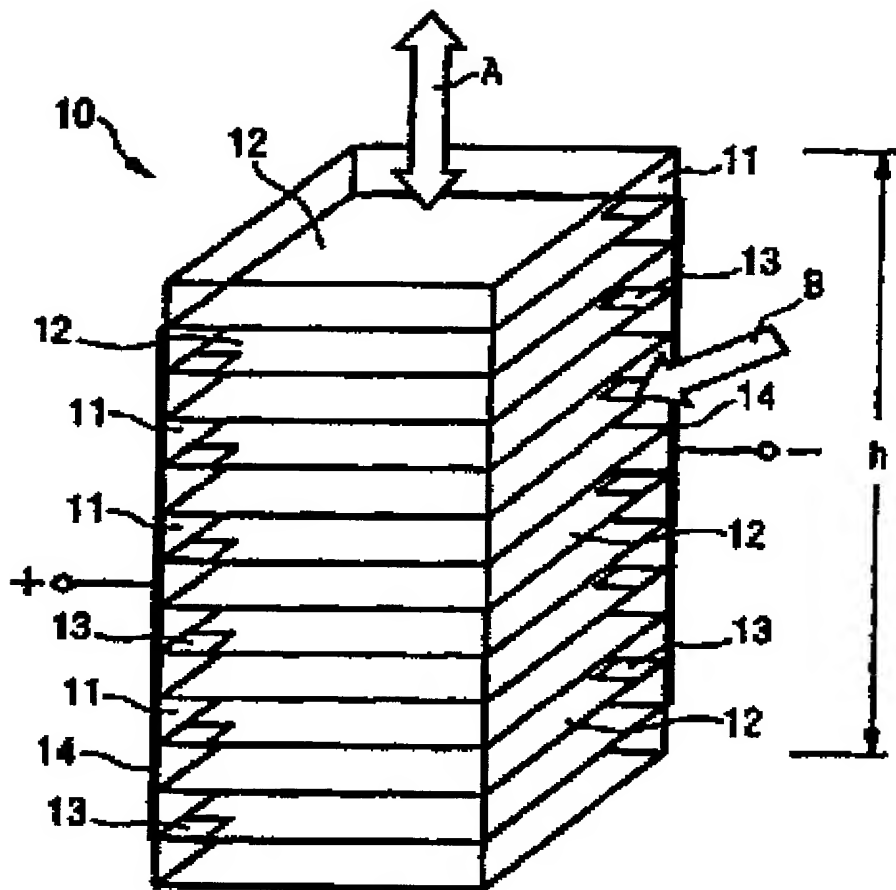


AN: PAT 1999-386036  
TI: Magnetic polarisation method for piezoelectric element such as piezo-actuator has pressure applied during polarisation process for opposing expansion resulting from applied electrical polarisation field  
PN: WO9931739-A1  
PD: 24.06.1999  
AB: The polarisation method is used for a piezoelectric element with a number of piezoelectric layers and intermediate metal electrodes, with a pressure exerted on the piezoelectric element prior to polarisation and maintained until the end of the polarisation process. The pressure opposes the expansion caused by the applied electrical polarisation field and is held below the elastic limit pressure. The applied electrical polarisation field has a field strength which is greater than the coercivity field strength of the piezoelectric element.;  
USE - For polarisation of monolithic multi-layer piezoactuator or valve drive. ADVANTAGE - Ensures stable polarisation condition.  
PA: (SIEI ) SIEMENS AG; (SIEI ) SIEMENS MATSUSHITA COMPONENTS;  
IN: CRAMER D; LUBITZ K; SCHUH C; STEINKOPFF T; WOLFF A;  
FA: WO9931739-A1 24.06.1999; EP1053568-B1 26.04.2006;  
**DE19756182-A1** 01.07.1999; **DE19756182-C2** 14.10.1999;  
EP1053568-A1 22.11.2000;  
CO: AT; BE; CH; CY; DE; DK; EP; ES; FI; FR; GB; GR; IE; IT; JP;  
LU; MC; NL; PT; SE; US; WO;  
DN: JP; US;  
DR: AT; BE; CH; CY; DE; DK; ES; FI; FR; GB; GR; IE; IT; LU; MC;  
NL; PT; SE;  
IC: H01L-041/083; H01L-041/22;  
MC: V06-L01A; V06-L02; V06-M06D; X25-L01;  
DC: V06; X25;  
FN: 1999386036.gif  
PR: DE1056182 17.12.1997;  
FP: 24.06.1999  
UP: 05.05.2006



(9)

Abstrakt



①⑨ **BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

①⑫ **Patentschrift**  
①⑩ **DE 197 56 182 C 2**

⑤① Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**H 01 L 41/22**  
H 01 L 41/083

②① Aktenzeichen: 197 56 182.9-35  
②② Anmeldetag: 17. 12. 97  
④③ Offenlegungstag: 1. 7. 99  
④⑤ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 14. 10. 99

DE 197 56 182 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦③ Patentinhaber:  
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦② Erfinder:  
Cramer, Dieter, Dipl.-Ing. (FH), 83607 Holzkirchen,  
DE; Lubitz, Karl, Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., 85521  
Ottoobrunn, DE; Schuh, Carsten, Dipl.-Phys.  
Dr.rer.nat., 85598 Baldham, DE; Steinkopff,  
Thorsten, Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., 85614 Kirchseeon,  
DE; Wolff, Andreas, Dipl.-Phys., 81739 München,  
DE

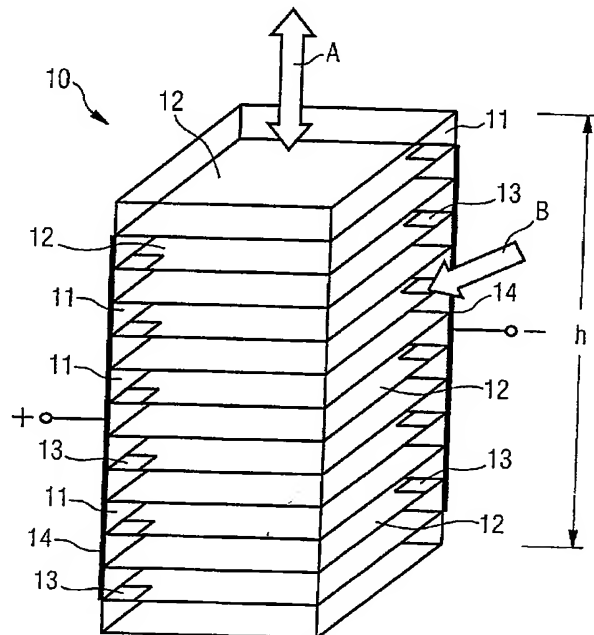
⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE 32 44 526 A1  
DE 26 03 639 A1  
US 40 88 917  
EP 4 79 382 A2

JAFFEE, B.: Piezoelectric Ceramics, Academic  
Press, London New York, 1971, S. 70-89;

⑤④ **Monolithisches piezokeramisches Bauelement und Verfahren zu seiner Herstellung**

⑤⑦ Monolithisches piezoelektrisches Bauelement, insbesondere Piezoaktor, mit einer Vielzahl von Piezokeramikschieben (11) und dazwischen liegenden Metallelektroden (12), wobei das Bauelement (10) durch Anlegen eines elektrischen Polarisationsfelds polarisiert ist, wobei das Bauelement (10) unter Anlegen einer Druckspannung  $T_p$  vor Beginn der Polarisation und bis zum Ende der Polarisation polarisiert ist, wobei die Druckspannung  $T_p$  der verlängernden Wirkung des anzulegenden elektrischen Polarisationsfelds entgegenwirkt und wobei für den Wert der Druckspannung  $T_p$  gilt:  $T_p < T_d$  und  $T_p > 0$ , mit  $T_d$  gleich dem Grenzdruck, der durch die Abweichung von der elastischen Geraden bestimmt ist.



DE 197 56 182 C 2

## Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein monolithisches piezokeramisches Bauelement nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 und ein Verfahren zu seiner Herstellung.

Piezoelektrische Bauelemente der genannten Art, beziehungsweise piezoelektrische monolithische Vielschicht-Piezoaktoren bestehen üblicherweise aus gemeinsam gesinternten Stapeln von Piezokeramik-Schichten mit dazwischen liegenden Metallelektroden. Jede Metallelektrode weist eine Aussparung auf, um dort die elektrischen Spannungen unterschiedlicher Polarität beim Polarisieren und beim späteren Betrieb des Bauelements zuzuführen. Die Aussparungen sind an jeder zweiten Elektrode an jeweils zwei gegenüberliegenden Kanten oder Seiten ausgebildet. Im Bereich der Aussparungen der Elektroden sind die jeweils übernächsten Elektroden mit einer von oben nach unten durchgehenden Metallisierungsbahn verbunden. Ein solches Bauelement ist in Fig. 1 dargestellt und wird im Rahmen der Figurenbeschreibung näher erläutert.

Bei Betrieb solcher Bauelemente parallel zur Polarisationsrichtung werden zwar große Kräfte, aber nur kleine relative Auslenkungen erreicht. Zur Erzielung geringer Betriebsspannungen bestehen die Bauelemente aus einer Vielzahl von Einzelschichten. Zur Polarisierung der Bauelemente wird an diese ein elektrisches Polarisationsfeld angelegt, wodurch sich eine maximale remanente Polarisierung und eine geordnete Verteilung der in Feldrichtung in den Kristallen der Keramik ausgerichteten Domänen gegenüber dem unpolarisierten Ausgangszustand ergibt. Nach der Polarisierung ist das Bauelement bleibend in Richtung des angelegten Felds beziehungsweise der remanenten Polarisierung verlängert. Diese bleibende Verlängerung hat zur Folge, daß im inaktiven und nicht durch Feldeinwirkung verlängerten Kontaktierungsbereich Zugspannungen auftreten. Dadurch können im piezoelektrisch inaktiven Kontaktierungsbereich bei der Polarisierung des Bauelements Risse parallel zu den Elektroden auftreten, die zwar im Übergangsbereich zum aktiven Bereich des Bauelements zum Stillstand kommen, die aber im späteren Betrieb des Bauelements zu Folgeschäden und schließlich zum Ausfall des Bauelements führen können. Weiterhin ist bei den bekannten Bauelementen von Nachteil, daß sich die Bauelemente nach Inbetriebnahme innerhalb der ersten Betriebszyklen noch in ihrer Länge und/oder ihrem Arbeitshub verändern. Die Bauelemente erreichen somit erst nach einer längeren Betriebsdauer ihren endgültigen Zustand, wodurch eine Nachjustage während des Betriebs notwendig wird. Dies ist insbesondere deshalb von Nachteil, da die Bauelemente üblicherweise im eingeklemmten Zustand betrieben werden. Es besteht deshalb ein Bedarf nach piezoelektrischen Bauteilen, die mit dem Betriebsbeginn des Bauteils eine stabile Anwendung gestatten.

Aus DE 32 44 526 A1 geht eine piezoelektrische Anordnung hervor, bei der ein piezoelektrischer Stapel in einer Spanneinrichtung angeordnet ist. Die Spanneinrichtung hat die Aufgabe, den Stapel vorzuspannen, um eine mechanische Festigkeit des Stapels zu gewährleisten. Die Spanneinrichtung wird deshalb auch bei einer Polarisierung des Stapels zur Gewährleistung einer mechanischen Festigkeit benötigt. Nachteilig wirkt sich aus, daß hier keine monolithische Bauweise vorliegt und daß der Stapel ohne die Spanneinrichtung nicht betrieben werden kann.

Aus DE 26 03 639 A1 geht ein scheibenförmiger ferroelektrischer Körper hervor, der zunächst mit einem Trägerkörper verbunden wird und erst danach polarisiert wird. Dadurch gelingt es, eine dauerhafte Verbindung zwischen dem Körper und dem Trägerkörper zu ermöglichen. Um eine gute Verbindung zwischen diesen Bauteilen zu erhalten,

werden bei der Polarisierung der Keramik der Körper und der Trägerkörper mit Hilfe einer Einspannvorrichtung zusammengedrückt.

Um das Auftreten von Polungsrisen beispielsweise in monolithischen Piezoaktoren zu vermeiden ist aus der gattungsbildenden EP 0 479 328 A2 ein Verfahren bekannt, bei dem durch ein aufwendiges Sonderbedruckungs- und Stapelverfahren im inaktiven Kontaktierungsbereich parallel zu den Elektroden in den Keramikschichten vorbeugend Entlastungsschlitzte erzeugt werden. Diese Entlastungsschlitzte sollen die bei der Polarisierung entstehenden mechanischen Zugspannungen ähnlich wie die Polungsrisse selbst entlasten. Allerdings wird bei derartig ausgebildeten Bauelementen aufgrund der noch auftretenden Längenänderungen nach Betriebsbeginn ein stabiler Betriebszustand erst nach einer Reihe von Betriebszyklen erreicht.

Weiterhin ist bereits vorgeschlagen worden, daß durch gleichzeitige Druckbelastung mit einem Druck von 30 bis 40 MPa bei der Polarisierung Polungsrisse vermieden werden können. Diese hohen Drücke können zwar zur Vermeidung von Polungsrisen beitragen, allerdings führen sie nicht zu einem stabilen Betrieb des Bauelements mit optimalen Kennwerten direkt ab Betriebsbeginn des Bauteils.

Ausgehend vom genannten Stand der Technik liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein piezoelektrisches Bauelement anzugeben, das direkt ab Betriebsbeginn einen stabilen Betrieb mit optimalen Kennwerten zeigt, sowie ein Verfahren zu seiner Herstellung.

Die Aufgabe wird durch die in Anspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst.

Durch die Erfindung wird ein über die gesamte Betriebsdauer des Bauelements – das heißt direkt ab Betriebsbeginn des Bauteils – stabiler Betriebszustand mit stabilen Kennwerten und einem stabilen Polarisierungszustand ermöglicht. Ein aufwendiges Nachjustieren der Bauelemente im eingebauten Zustand nach einer Reihe von Betriebszyklen kann somit entfallen. Da die Bauelemente üblicherweise eine maximale Betriebsdauer von bis zu  $1 \times 10^9$  Betriebszyklen haben, kann die Lebensdauer der Bauelemente optimal ausgenutzt werden, was neben verringerten Standzeiten der mit den Bauelementen bestückten Vorrichtungen auch zu einer erheblichen Kostenreduktion führt. Weiterhin wird die Anzahl und Größe der auftretenden Polungsrisse reduziert.

Vorteilhaft sind die einzelnen Metallelektroden über Metallisierungsbahnen miteinander verbunden.

In weiterer Ausgestaltung kann das Bauelement bis zu 1000 Einzelschichten, vorzugsweise 200 bis 400 Einzelschichten aufweisen.

Erfindungsgemäß kann das Bauelement eine Stapelhöhe von 5 bis 40 mm aufweisen.

In weiterer Ausgestaltung kann das Bauelement einen Arbeitshub von 5 bis 60 µm aufweisen.

Durch das erfindungsgemäße Herstellungsverfahren wird beispielsweise erreicht, daß das Bauelement unter anderem einen im Betrieb stabileren thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufweist, wodurch die Möglichkeit gegeben ist, unerwünschte Effekte durch thermische Längenänderungen über konstruktive Maßnahmen zu kompensieren.

Das Keramikmaterial hat vorzugsweise eine Struktur, die das Auftreten von Piezoelektrizität gestattet. Dies wird durch Ferroelektrika mit Perowskitstruktur erreicht. Hierbei tritt bei Unterschreiten der Curietemperatur eine spontane Polarisierung und damit auch eine Längenänderung auf, die mit einer Deformation des Kristallgitters verbunden ist. Die Deformation ergibt sich aus der Tatsache, daß nach dem Sintern der Keramik jedes kristalline Korn von anderen Körnern umgeben ist. Bei der Umwandlung in den ferroelektrischen Zustand wird jedes Korn spontan deformiert, gleich-

zeitig aber auch durch benachbarte Körner behindert. Auftretende innere Spannungen können teilweise nur durch Ausbildung von Domänen in den Körnern abgebaut werden. Dabei handelt es sich um eine tetragonale oder rhomboedrische Verzerrung des ursprünglichen kubischen Gitters, wodurch sich 180°- und 90°-Domänen in der tetragonalen Phase und 180°, 71° beziehungsweise 109°-Domänen in der rhomboedrischen Phase bilden. Nach der spontanen Polarisation sind die Dipolmomente der einzelnen Domänen so ausgerichtet, daß sie sich aufgrund der statistisch verteilten Polarisationsrichtungen kompensieren. Dies ist in Fig. 2a dargestellt und wird weiter unten näher beschrieben. Durch Einwirkung eines elektrischen Polarisationsfelds werden die Dipole in den einzelnen Kristalliten orientiert, wodurch eine Polarisation und Längenänderung des gesamten Körpers auftritt. Eine solche Polarisation ist in Fig. 2b dargestellt und wird im Rahmen der Figurenbeschreibung näher erläutert.

Als Metallelektroden können beispielsweise – jedoch nicht ausschließlich – AgPd-Elektroden verwendet werden.

Erfindungsgemäß wird die Polarisation nicht am freien Bauteil, sondern unter einer gleichzeitig anliegenden Druckspannung  $T_p$  durchgeführt. Für die Druckspannung  $T_p$ , die der verlängernden Wirkung des elektrischen Polarisationsfelds entgegenwirkt und bereits vor Beginn des Anlegens der elektrischen Feldstärke bis zum Ende der Polarisation aufgebracht wird, gelten erfindungsgemäß zwei Einschränkungen.

Zunächst ist die Druckspannung  $T_p$  kleiner als der Grenzdruck  $T_d$  zu wählen. Der Grenzdruck  $T_d$  ergibt sich wie folgt: Sowohl in einer unpolarisierten als auch in einer polarisierten Piezokeramik lassen sich ab einem bestimmten Druck oder Zug, der durch die Abweichung von der elastischen Gerade im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bestimmt ist, Domänen durch die Bewegung von 90°, beziehungsweise 71°/109°-Domänenwänden umschalten, so daß auch nach Entfernen der mechanischen Belastung eine bleibende Längenänderung vorliegt. Dieser Druck wird im Sinne der vorliegenden Erfindung als Grenzdruck  $T_d$  bezeichnet. Durch die Wahl der Druckspannung  $T_p$  kleiner als der Grenzdruck  $T_d$  wird erreicht, daß nach der Polarisation noch ein ausreichend großer Anteil von schaltbaren und zur Auslenkung beitragenden Domänenwänden verbleibt. Der Grenzdruck  $T_d$  hängt vom verwendeten Piezokeramikmaterial ab. Vorteilhaft beträgt der Grenzdruck  $T_d < 20$  MPa. Weiterhin muß die Druckspannung  $T_p$  größer als Null gewählt werden.

Nach der Beaufschlagung des zu polarisierenden Bauteils mit der Druckspannung  $T_p$  wird an das Bauelement ein elektrisches Polarisationsfeld angelegt, wobei die elektrische Feldstärke größer ist als die Koerzitivfeldstärke für das Bauelement. Dadurch wird das Bauelement in der vorstehend beschriebenen Weise polarisiert.

Der zeitliche Verlauf der bei der Polarisierung anliegenden Spannung kann einem trapezförmigen Verlauf entsprechen. Es ist aber auch ein sinusförmiger Verlauf, insbesondere mit variabler Frequenz denkbar. Insbesondere ist ein dem Betriebsfall mit maximaler Betriebsspannung entsprechender Verlauf am Ende der Polarisation vorteilhaft.

Durch die erfindungsgemäß gewählte Druckspannung  $T_p$  hat das Bauelement nach der Polarisierung eine geringe Längenänderung gegenüber dem unpolarisierten Ausgangszustand, was eine entsprechende Reduzierung der Zugspannungen im inaktiven Kontaktierungsbereich und eine sich daraus ableitende Reduktion der Anzahl und Größe von Polungsrissen zur Folge hat. Gleichzeitig ist die Höhe der Druckspannung  $T_p$  ausreichend niedrig gewählt, so daß nach der Polarisation eine ausreichend große Anzahl an

schaltbaren und zur Auslenkung beitragenden Domänenwänden verbleibt. Bei Verwendung eines zu hohen Drucks, wie dies beispielsweise zum Stand der Technik beschrieben wurde, können zwar die Polungsrisse vermieden werden, allerdings verbleibt nur ein sehr geringer Anteil von schaltbaren und zur Auslenkung beitragenden Domänenwänden. Bei deutlich niedrigerem Betriebsdruck ergibt sich dann der Nachteil eines instabilen Betriebs und die nachträgliche Entstehung von Rissen. Die erfindungsgemäße Polarisierung hat demnach zur Folge, daß die bei üblicher Polarisierung erreichbare Remanenz verringert ist. Dies hat allerdings den Vorteil, daß das Bauelement direkt ab Betriebsbeginn mit stabilen Kennwerten betrieben werden kann.

Vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens ergeben sich aus den rückbezogenen Unteransprüchen.

Erfindungsgemäß kann für den Wert der Druckspannung  $T_p$  weiterhin gelten:  $T_p \geq T_b$ , mit  $T_b$  gleich dem statischen Druck, der im späteren Betrieb des Bauelements angelegt wird.

Im statischen und besonders im dynamischen Betrieb werden die Bauelemente in der Regel mit einem statischen Druck  $T_b$  beaufschlagt. Diese Vorlast hat zum Ziel, einen kraftschlüssigen Betrieb ohne Spalteneffekte zu gewährleisten sowie das Auftreten von dynamischen, trägheitsbedingten Zugspannungen zu verhindern. Vorteilhafte Werte für den statischen Druck liegen zwischen 10 und 20 MPa.

In weiterer Ausgestaltung kann die Druckspannung  $T_p$  einen Wert aufweisen, bei dem sich die Länge des Bauelements nach der Polarisation nur um maximal +30% bis -10% der bei druckloser Polarisation erreichten Längenänderung verändert. Dieser Wert ist materialabhängig und wird vorteilhaft experimentell ermittelt. Die Längenänderung bezieht sich in gleicher Weise auf das druckentlastete oder mit Druck beaufschlagte Bauelement.

Erfindungsgemäß kann die Druckspannung  $T_p$  einen Wert von 10 bis 20 MPa, vorzugsweise 15 bis 20 MPa aufweisen. Bei einem solchen Wert für die Druckspannung  $T_p$  wird erreicht, daß die Druckspannung bei den oben beschriebenen vorteilhaften Werten für den Grenzdruck  $T_d$  und den statischen Druck  $T_b$  die erforderlichen Bedingungen erfüllt.

Vorteilhaft kann die Druckspannung  $T_p$  über ein hydraulisches oder ein pneumatisches System, oder aber durch Federkraft aufgebracht werden. Die Erfindung ist jedoch nicht auf die genannten Beispiele beschränkt.

In weiterer Ausgestaltung kann das elektrische Polarisationsfeld eine Feldstärke aufweisen, die kleiner ist als die Durchschlagsfestigkeit des Bauelements. Vorteilhaft ist sie experimentell so einzustellen, daß ein optimaler Arbeitshub des Bauelements erreicht wird. Vorteilhaft kann die Feldstärke dem zwei- bis fünffachen Wert der Koerzitivfeldstärke entsprechen.

In weiterer Ausgestaltung weist das elektrische Polarisationsfeld eine Feldstärke von 2 bis 2,5 kV/mm auf.

Erfindungsgemäß kann die Polarisation bei einer Polarisierungstemperatur von 20 bis 150°C durchgeführt werden.

Vorteilhaft wird die Polarisation des Bauelements in einem isolierenden Medium durchgeführt, insbesondere in Luft, Öl oder Schutzgas.

Die Polarisationszeit kann erfindungsgemäß bis zu 700 Sekunden, vorzugsweise etwa 500 Sekunden betragen.

Die erfindungsgemäßen Bauelemente weisen von Betriebsbeginn an stabile Kennwerte auf. Weiterhin wird die Anzahl und Größe der auftretenden Polungsrisse reduziert. Bei den erfindungsgemäßen Bauelementen ist dem Umstand Rechnung getragen, daß bei im Großsignal mit hohen Feldstärken (siehe oben) betriebenen piezoelektrischen Bauelementen der kleinere Teil der Auslenkung durch den linearen,

reversiblen, der Remanenz proportionalen Anteil des Piezoeffekts gegeben wird, und daß der größere Teil der Auslenkung durch die Bewegung von Domänenwänden bewirkt wird. Durch den erfindungsgemäß gewählten spezifischen Wert für die Druckspannung  $T_p$  wird während der Polarisierung der Bauelemente erreicht, daß ein ausreichend großer Anteil von schaltbaren und zur Auslenkung beitragenden Domänenwänden verbleibt und gleichzeitig eine vorteilhafte Polarisierung durchgeführt werden kann.

Die Einhaltung der Polarisierungsbedingungen des bei dem erfindungsgemäßen Bauelements verwendeten Polarisierungsverfahrens kann leicht überprüft werden, indem das polarisierte Bauelement über seine Curietemperatur erwärmt und somit einer thermischen Depolarisierung unterworfen wird und gleichzeitig seine Längenänderung bestimmt wird, die maximal 30% des bei einer drucklosen Polarisierung auftretenden Werts erreichen darf.

Wie erwähnt, weist das erfindungsgemäße Bauelement stabile Kennwerte direkt ab Betriebsbeginn auf, so daß ein nachteiliges Nachjustieren zu einem späteren Zeitpunkt unterbleiben kann. Gleichzeitig wird die Anzahl und Größe der Polungsrisse verringert, was die Lebensdauer des Bauelements verlängert. Im Hinblick auf die Vorteile, Wirkungen, Effekte und Funktionen des erfindungsgemäßen Bauelements wird auf die vorstehenden Ausführungen zum erfindungsgemäßen Verfahren vollinhaltlich Bezug genommen und hiermit verwiesen.

Bevorzugte Ausgestaltungen des piezoelektrischen Bauelements ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Bevorzugte Verfahren zur Herstellung des beschriebenen Bauelements gehen aus den Ansprüchen 7 bis 15 hervor.

Die Erfindung wird nun anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die beiliegende Zeichnung näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 in schematischer Ansicht den Aufbau eines piezoelektrischen Bauelements; und

Fig. 2a bis 2c verschiedene Polarisationszustände des Bauelements bei unterschiedlichen Bedingungen.

In Fig. 1 ist ein als monolithischer Vielschicht-Piezoaktor ausgebildetes piezoelektrisches Bauelement 10 dargestellt. Das Bauelement 10 kann beispielsweise als Ventilantrieb fungieren und hat eine Betriebsdauer von bis zu  $1 \times 10^9$  Betriebszyklen. Das Bauelement 10 weist eine Vielzahl von Piezokeramiksichten 11 und dazwischen liegenden Metallelektroden 12 auf. Die Metallelektroden 12 weisen jeweils eine Aussparung 13 auf, wobei die Aussparungen 13 benachbarter Elektroden 12 jeweils an gegenüberliegenden Kanten oder Seiten der Elektroden 12 ausgebildet sind. Die im Bereich der Aussparungen 13 an die Oberfläche tretenden jeweiligen benachbarten, übereinander liegenden Elektroden 12 sind über Metallisierungsbahnen 14 untereinander verbunden. Über die Metallisierungsbahnen 14 kann das Bauelement 10 mit einem elektrischen Feld zunächst zur Polarisierung und anschließend zum Betrieb beaufschlagt werden.

Um mit dem Bauelement 10 Arbeitshübe von 5 bis 60 µm erreichen zu können, ist eine Stapelhöhe  $h$  von 5 bis 40 µm erforderlich, was einer Anzahl von bis zu 1000 Einzelschichten 11, 12 entspricht.

Nach Unterschreiten der Curietemperatur weisen die gesinterten Keramikkörner der Keramikschichten 11 eine spontane Polarisierung auf, die mit einer Deformation des Kristallgitters verbunden ist. Auftretende innere Spannungen können teilweise nur durch die Ausbildung von Domänen in den Körnern abgebaut werden. Nach der spontanen Polarisierung sind die Dipolmomente der einzelnen Domänen so ausgerichtet, daß sie sich aufgrund der statistisch verteilten Polarisationsrichtungen kompensieren. Dies ist durch die entsprechenden Pfeile in Fig. 2a dargestellt.

Durch Einwirkung eines elektrischen Polarisationsfelds am freien und ohne Druckspannung  $T_p$  beaufschlagten Bauelement 10 werden die Dipole in den einzelnen Kristalliten orientiert, wodurch eine Polarisierung und Längenänderung des gesamten Körpers in Pfeilrichtung A auftritt. Eine solche Polarisierung ist in Fig. 2b dargestellt.

Durch die auftretenden Zugspannungen im inaktiven Kontaktierungsbereich B können bei der Polarisierung die sogenannten Polungsrisse auftreten.

Nachfolgend wird nun exemplarisch eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Polarisierungsverfahrens beschrieben.

Das zu polarisierende Bauelement 10 kann in ein Polarisationsmedium – beispielsweise Luft, Öl oder Schutzgas – eingebracht und wahlweise auf eine Polarisierungstemperatur von 20 bis 150°C gebracht werden. Bereits vor dem eigentlichen Polarisierungsschritt wird das Bauelement mit einer Druckspannung  $T_p$  von 10 bis 20 MPa beaufschlagt. Dabei wirkt die Druckspannung  $T_p$  der verlängernden Wirkung des Polarisationsfelds, die durch den Pfeil A angedeutet ist, entgegen. Die Druckspannung  $T_p$  auf das Bauelement 10 wird während der gesamten Polarisierung aufrechterhalten. Anschließend wird an dem Bauelement 10 über die Metallisierungsbahnen 14 ein elektrisches Polarisationsfeld mit einer Stärke von 2 bis 2,5 kV/mm angelegt, was in Fig. 1 durch die Symbole "+" und "-" angedeutet ist. Nach Ablauf einer ausreichenden Polarisationszeit von etwa 500 Sekunden wird die Polarisierung beendet, und das Bauelement 10 kann in den Betrieb übernommen werden.

Die erfindungsgemäße Polarisierung hat zur Folge, daß die bei üblicher, druckloser Polarisierung erreichbare Remanenz gemäß Fig. 2b zunächst verringert ist. Dies ist in Fig. 2c dargestellt. Allerdings verbleibt ein größerer Anteil von im Großsignalbetrieb schaltbaren und zur Auslenkung beitragenden Domänenwänden. Weiterhin ist durch die im Vergleich zu Fig. 2b vorhandene geringere Polung gemäß Fig. 2c eine Reduzierung der Anzahl und Größe von Polungsrisen möglich. Das gemäß Fig. 2c polarisierte Bauelement 10 weist einen stabilen Betrieb mit entsprechenden stabilen Kennwerten direkt ab Betriebsaufnahme auf, so daß Einschwing-Betriebszyklen nach Betriebsaufnahme sowie ein nachteiliges Nachjustieren entfallen können.

Die Polarisierung der Bauelemente kann gemäß einer ersten Ausführungsvariante zunächst in einer separaten Vorrichtung durchgeführt werden. Nach der Polarisierung wird das Bauelement aus dieser Vorrichtung entnommen und in seiner dafür vorgesehenen Betriebsumgebung eingebaut. Nach dem Einbau des polarisierten Bauelements wird das Bauelement anschließend mit einem für den Betrieb vorteilhaften statischen Druck  $T_b$  beaufschlagt.

Gemäß einer anderen Ausführungsvariante erfolgt die Polarisierung des Bauelements am späteren Betriebsort des Bauelements.

Das hat den Vorteil, daß die Druckspannung  $T_p$  nach Beendigung der Polarisierung nicht mehr entfernt werden muß. Das Bauelement kann also zunächst unpolarisiert in seine endgültige Betriebsumgebung eingebaut, mit Druck beaufschlagt, polarisiert und anschließend betrieben werden. Da das Bauteil bei der erfindungsgemäßen Polarisierung seine Gesamtlänge nur geringfügig ändert, kann eine entsprechende Anordnung wie folgt realisiert werden: Das unpolarisierte Bauelement – beispielsweise ein Aktor – wird in das Innere einer mit einem festen Boden verschlossenen Rohrfeder eingesetzt. Die Rohrfeder wird mit einer dem Polarisationsdruck  $T_p$ , beziehungsweise dem Betriebsdruck entsprechenden Kraft gedehnt. Anschließend wird eine Deckplatte in die Rohrfeder eingesetzt und mit der Rohrfeder verschweißt. Der so unter Druckspannung in die Rohrfeder ein-

gebaute Aktor wird anschließend erfindungsgemäß polarisiert und in gleicher Anordnung betrieben.

#### Patentansprüche

1. Monolithisches piezoelektrisches Bauelement, insbesondere Piezoaktor, mit einer Vielzahl von Piezokeramiksichten (11) und dazwischen liegenden Metallelektroden (12), wobei das Bauelement (10) durch Anlegen eines elektrischen Polarisationsfelds polarisiert ist, wobei das Bauelement (10) unter Anlegen einer Druckspannung  $T_p$  vor Beginn der Polarisation und bis zum Ende der Polarisation polarisiert ist, wobei die Druckspannung  $T_p$  der verlängernden Wirkung des anzulegenden elektrischen Polarisationsfelds entgegenwirkt und wobei für den Wert der Druckspannung  $T_p$  gilt:  $T_p < T_d$  und  $T_p > 0$ , mit  $T_d$  gleich dem Grenzdruck, der durch die Abweichung von der elastischen Geraden bestimmt ist. 10
2. Bauelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Metallelektroden (12) über Metallisierungsbahnen (14) miteinander verbunden sind. 20
3. Bauelement nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Bauelement (10) bis zu 1000 Einzelschichten (10, 11), insbesondere 200 bis 400 Einzelschichten (10, 11) aufweist. 25
4. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Bauelement (10) eine Stapelhöhe ( $h$ ) von 5 bis 40 mm aufweist.
5. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Bauelement (10) einen Arbeitshub von 5 bis 60  $\mu\text{m}$  aufweist. 30
6. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Druckspannung  $T_p$  einen Wert aufweist, bei dem die Länge des Bauelements nach der Polarisation um maximal +30% bis -10% der bei druckloser Polarisation erreichten Längenänderung verändert ist. 35
7. Verfahren zum Herstellen eines monolithischen piezoelektrischen Bauelements, insbesondere eines Piezoaktors, der aus einer Vielzahl von Piezokeramiksichten und dazwischen liegenden Metallelektroden gebildet ist, nach einem der Ansprüche 1 bis 6, gekennzeichnet durch folgende Schritte: 40
  - a) Anlegen einer Druckspannung  $T_p$  an das zu polarisierende Bauelement vor Beginn der Polarisation und bis zum Ende der Polarisation, wobei die Druckspannung  $T_p$  der verlängernden Wirkung des anzulegenden elektrischen Polarisationsfelds entgegenwirkt und wobei für den Wert der Druckspannung  $T_p$  gilt:  $T_p < T_d$  und  $T_p > 0$ , mit  $T_d$  gleich dem Grenzdruck, der durch die Abweichung von der elastischen Geraden bestimmt ist; und 45
  - b) Anlegen eines elektrischen Polarisationsfelds an das Bauelement, wobei die angelegte Feldstärke größer ist als die Koerzitivfeldstärke für das Bauelement. 50
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß für den Wert der Druckspannung  $T_p$  weiterhin gilt:  $T_p \geq T_b$ , mit  $T_b$  gleich dem statischen Druck, der im späteren Betrieb des Bauelements angelegt wird. 60
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Druckspannung  $T_p$  einen Wert von 10 bis 20 MPa, vorzugsweise 15 bis 20 MPa aufweist. 65
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Druckspannung  $T_p$  über

ein hydraulisches oder pneumatisches System oder durch Federkraft aufgebracht wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß das elektrische Polarisationsfeld eine Feldstärke aufweist, die kleiner ist als die Durchschlagfestigkeit des Bauelements und insbesondere dem zwei- bis fünffachen Wert der Koerzitivfeldstärke entspricht.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß das elektrische Polarisationsfeld eine Feldstärke von 2 bis 2.5 kV/mm aufweist.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Polarisation bei einer Polarisationstemperatur von 20 bis 150°C durchgeführt wird.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Polarisation in einem isolierenden Medium durchgeführt wird, insbesondere in Luft, Öl oder Schutzgas.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Polarisationszeit bis 700 Sekunden, insbesondere etwa 500 Sekunden beträgt.

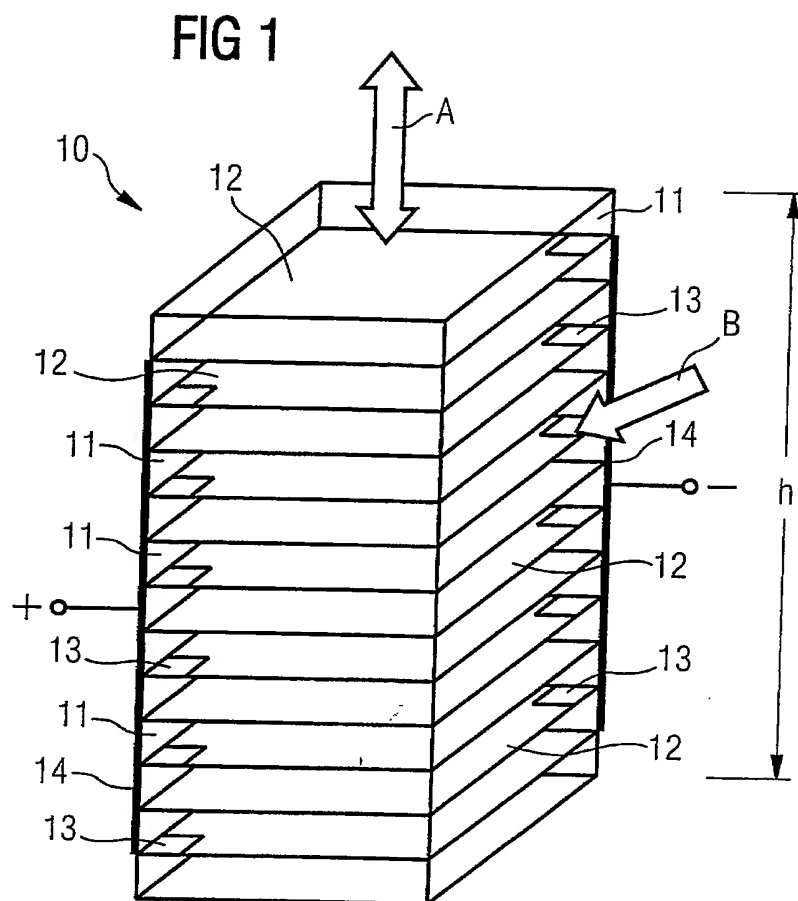
---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

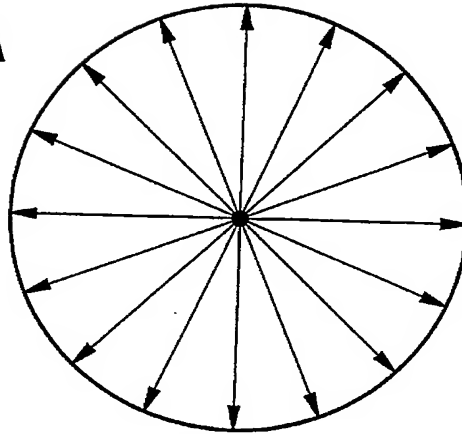
---

- Leerseite -

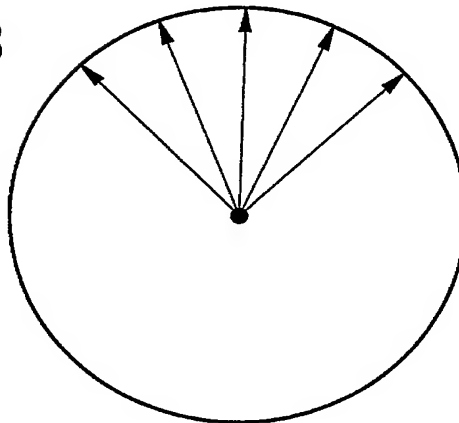




**FIG 2 A**



**FIG 2 B**



**FIG 2 C**

